



# Effet des contraintes multiaxiales sur le comportement magnétique des aciers électriques : caractérisation expérimentale et modélisation multi-échelle

Mahmoud Rekik, Laurent Daniel, Olivier Hubert

## ► To cite this version:

Mahmoud Rekik, Laurent Daniel, Olivier Hubert. Effet des contraintes multiaxiales sur le comportement magnétique des aciers électriques : caractérisation expérimentale et modélisation multi-échelle. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065360

**HAL Id: hal-01065360**

**<https://hal.science/hal-01065360>**

Submitted on 18 Sep 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **Effet des contraintes multiaxiales sur le comportement magnétique des aciers électriques : caractérisation expérimentale et modélisation multi-échelle**

Mahmoud REKIK<sup>1,2</sup>, Laurent DANIEL<sup>2,3</sup>, Olivier HUBERT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LMT-Cachan (ENS Cachan, CNRS (UMR8535), UPMC, PRES Universud Paris), 94235 Cachan, France

<sup>2</sup> LGEP (SUPELEC, CNRS (UMR8507), UPMC, Univ Paris-Sud), 91192 Gif sur Yvette, France

<sup>3</sup> School of Materials, University of Manchester, M1 7HS, Manchester, UK

**RÉSUMÉ** – Des essais de caractérisation magnéto-mécanique multiaxiaux sont présentés. La mise en œuvre d'un modèle de comportement magnéto-mécanique avec prise en compte de l'hystérésis accompagne ce travail expérimental. La comparaison des résultats expérimentaux et numériques montre un bon accord qualitatif. Ce type de démarche est indispensable pour prédire l'évolution des propriétés des matériaux magnétiques constitutifs des machines électriques sous sollicitations extrêmes, et en particulier les machines électriques à grande vitesse.

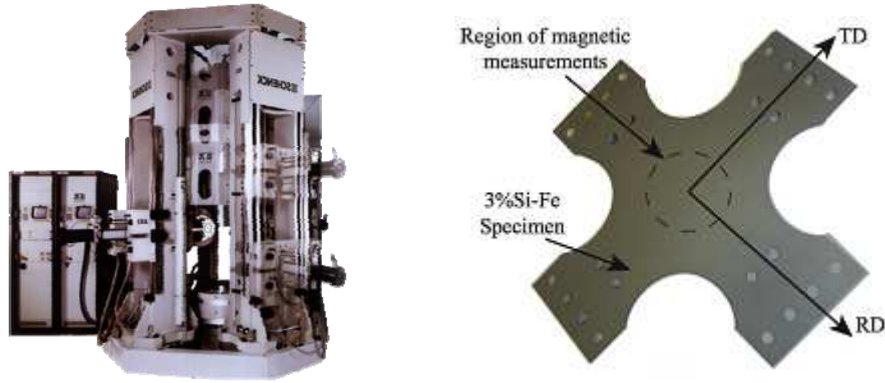
**MOTS-CLÉS** – Contrainte biaxiale, magnéto-élasticité, susceptibilité magnétique, pertes par hystérésis, fer-silicium NO, modélisation micro-mécanique

## **1. Introduction**

Les parties électrotechniques d'un avion représentent environ 35% de la masse des équipements de la chaîne de puissance électrique. Par ailleurs, la puissance électrique que doit délivrer un aéronef de nouvelle génération est multipliée par quatre par rapport à un aéronef conventionnel. Cela induit un accroissement exponentiel du nombre d'équipements électriques, de leur masse globale et de leur encombrement. Pour atteindre les objectifs de réduction de masse, il est impératif de trouver un ensemble de solutions permettant d'optimiser les systèmes électriques embarqués. Une solution consiste à augmenter la puissance massique de ces équipements par une augmentation des vitesses de rotation. Ceci conduit à une augmentation de l'intensité des contraintes mécaniques, les contraintes d'inertie venant s'ajouter à celles héritées des processus d'élaboration de la tôle et/ou de la phase d'assemblage (découpe, soudage, ...). Dans cette communication des résultats expérimentaux récents sur l'effet d'un état de contraintes biaxial sur le comportement magnétique d'un alliage de fer-silicium à grains non orientés seront présentés. Ces résultats incluent des mesures de susceptibilité, de champ coercitif et de pertes magnétiques. Dans un deuxième temps un modèle multi-échelle permettant de décrire ces phénomènes de couplage magnéto-mécanique sera présenté, et ses prédictions comparées aux résultats de mesure.

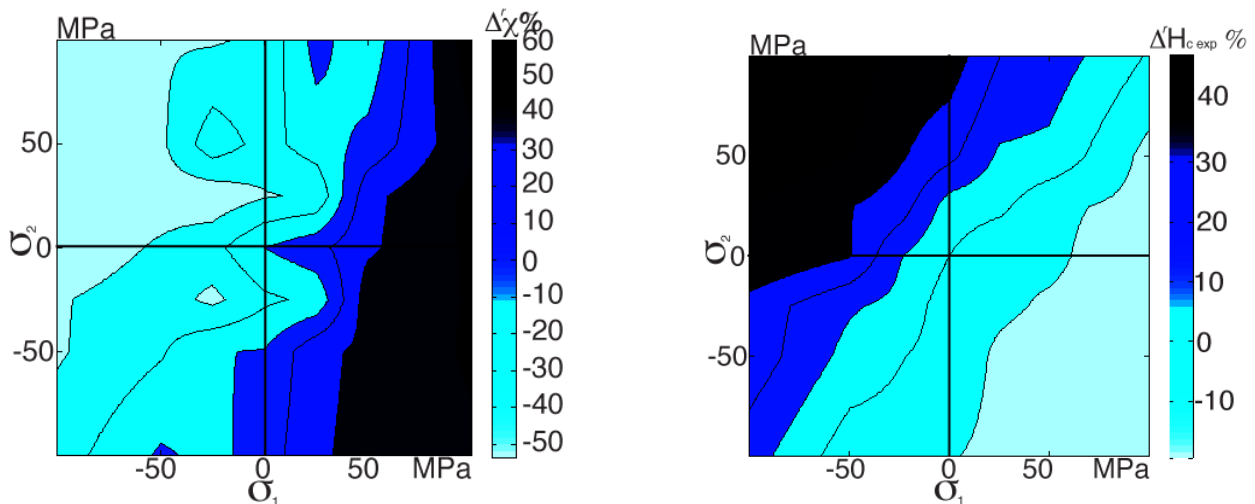
## **2. Dispositif expérimental**

Des essais non conventionnels ont été effectués de manière à s'approcher des contraintes en service subies par un rotor de machine électrique [1]. Les essais sont effectués sur la machine d'essai triaxiale ASTREE du LMT-Cachan (figure 1a). Le comportement magnétique est mesuré sur un échantillon cruciforme (figure 1b) chargé en traction-compression selon deux directions perpendiculaires. L'éprouvette est prélevée dans une tôle de fer-silicium de 0,5 mm d'épaisseur et assemblée dans une structure sandwich avec une âme en bakélite, de manière à éviter les problèmes de flambement en compression. La bakélite étant amagnétique et non conductrice, elle ne perturbe pas la mesure magnétique. Le chargement magnétique est appliqué à l'aide d'une culasse bobinée en U. Le champ magnétique et l'aimantation sont mesurés grâce à une bobine de mesure de champ calibrée (H-coil) et un capteur B-pointes. 41 états de chargement, dans le plan ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ) des contraintes biaxiales, ont été successivement appliqués à l'échantillon. L'échantillon est désaimanté avant chaque mesure. Les mesures consistent en une série de cycles d'hystérésis sous contraintes pour des fréquences de courant d'alimentation variant de 1 à 800 Hz. Des mesures anhystérétiques ont également été conduites.



**Figure 1. (a) Machine triaxiale ASTREE ; (b) Éprouvette pour essais biaxiaux.**

A titre d'exemple, la figure 2 présente les résultats obtenus pour la susceptibilité magnétique anhystérétique et le champ coercitif (mesure cyclique réalisée à 50Hz) lorsque le champ magnétique est appliqué dans la direction du laminage de la tôle. Les résultats sont tracés dans le plan des contraintes ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ),  $\sigma_1$  étant la contrainte appliquée dans la direction du laminage. Les figures représentent la variation relative de ces grandeurs par rapport à la valeur mesurée en l'absence de chargement mécanique (cette dernière est indiquée dans la légende de la figure 2).



**Figure 2. Variation des propriétés magnétiques sous contraintes dans le plan ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ) : (a) Susceptibilité anhystérétique ( $\chi_0 \approx 2000$ ) ; (b) Champ coercitif pour  $f=50$  Hz ( $H_{c0} \approx 125$  A/m).**

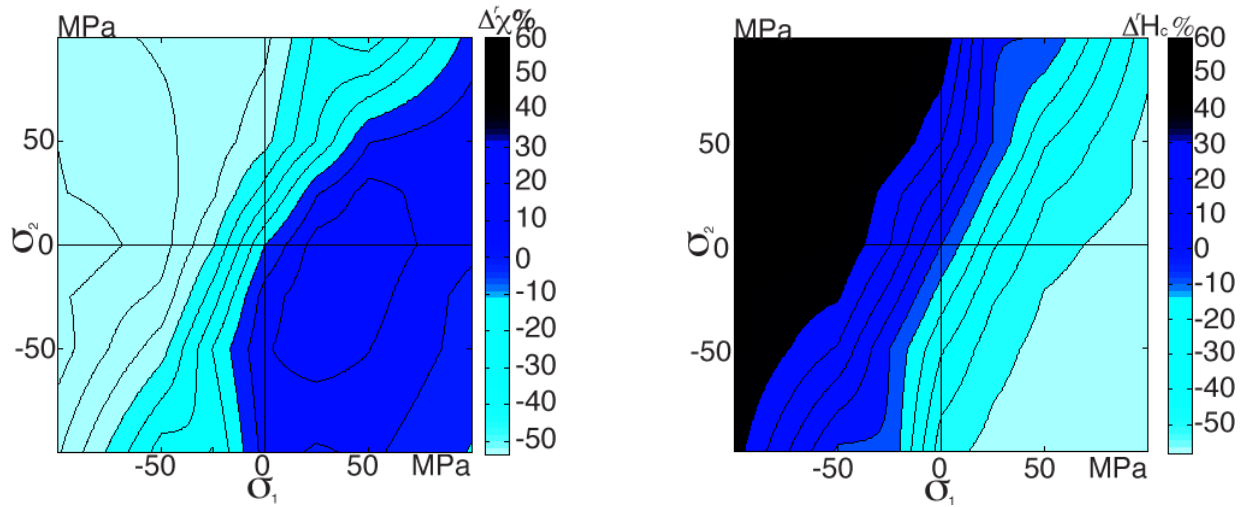
Pour la susceptibilité magnétique, on constate une augmentation sensible lorsqu'une contrainte de traction est appliquée parallèlement au champ magnétique (axe horizontal, partie positive), ou encore lorsqu'une contrainte de compression est appliquée perpendiculairement au champ (axe vertical, partie négative). Inversement une contrainte de compression parallèle au champ ou de traction perpendiculaire au champ dégrade la valeur de la susceptibilité. On constate une augmentation de la susceptibilité sous sollicitation de bitraction, et une diminution en bicompression. La susceptibilité minimale est obtenue pour des états de cisaillement avec  $\sigma_1$  négatif.

Pour le champ coercitif, on constate une symétrie par rapport à l'axe de cisaillement pur ( $\sigma_1 = -\sigma_2$ ). Cette symétrie n'est toutefois pas conservée pour de plus hautes fréquences. Le champ coercitif augmente avec  $\sigma_2$  (et diminue avec  $\sigma_1$ ). Ces variations sont très significatives et peuvent atteindre plus de 40% pour une contrainte de cisaillement de l'ordre de 50 MPa.

### 3. Modélisation multi-échelle

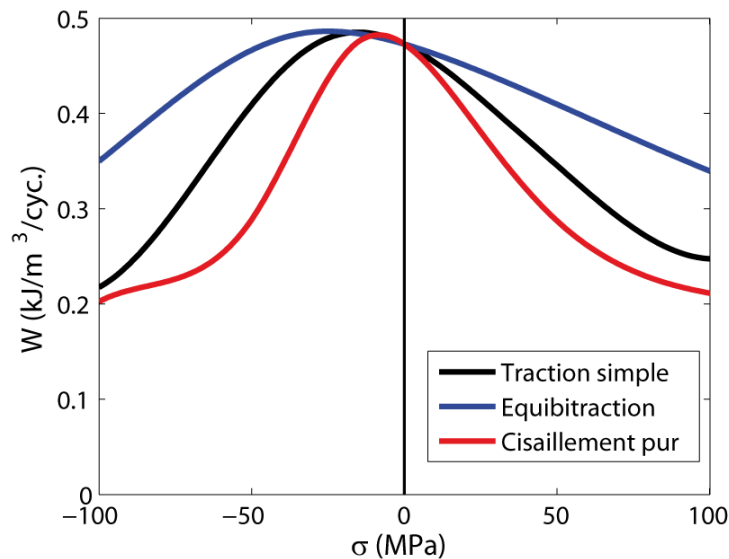
Un modèle multi-échelle pour le comportement magnéto-élastique anhystérétique [2,3] a été étendu de manière à intégrer les phénomènes de dissipation [4]. Le principe, qui sera détaillé à l'occasion de la conférence, repose sur la proposition de Hauser [5] d'ajouter une contribution irréversible au champ magnétique obtenu par l'approche anhystérétique. Si on se limite au régime quasi-statique, le modèle permet alors de calculer les pertes par hystérésis obtenues sur un cycle. La figure 3 présente les résultats obtenus pour la susceptibilité anhystérétique et le champ coercitif pour les mêmes conditions de contraintes que celles présentées en figure 2. Le modèle tend à surestimer la

susceptibilité et à sous-estimer le champ coercitif, mais on observe des tendances similaires entre résultats expérimentaux et numériques. L'augmentation de susceptibilité pour les valeurs de  $\sigma_1$  positives est toutefois sous-estimée alors que la dégradation pour les valeurs négatives de  $\sigma_1$  est elle surestimée. Concernant le champ coercitif, la symétrie par rapport à l'axe de cisaillement pur est bien prédite par le modèle, mais le modèle tend à surestimer les variations de champ coercitif, particulièrement lorsqu'il s'agit d'une diminution.



**Figure 3. Résultats de modélisation : Variation des propriétés magnétiques sous contraintes dans le plan  $(\sigma_1, \sigma_2)$**   
**(a) Susceptibilité anhystérétique ( $\chi_0 \approx 3300$ ) ; (b) Champ coercitif ( $H_{c0} \approx 80$  A/m)**

Le modèle permet également d'analyser l'évolution des pertes magnétiques dans des configurations de contraintes multiaxiales particulières. La figure 4 illustre ces résultats dans le cas d'une traction simple (parallèlement au champ magnétique appliqué), d'une sollicitation équilibiaxiale (avec le champ magnétique appliqué parallèlement à une contrainte principale) et dans le cas d'une sollicitation de cisaillement pur (avec le champ magnétique appliqué parallèlement à la contrainte principale positive). Ces résultats montrent une tendance à la diminution des pertes magnétiques sous contraintes. Il faut toutefois noter que les calculs ont été menés à champ magnétique maximum imposé, et non à induction imposée. Les cycles obtenus sous contraintes présentent donc parfois une induction maximale bien moindre que les cycles calculés en l'absence de contraintes.



**Figure 4. Pertes par hystérésis sous contraintes pour trois configurations de sollicitations mécaniques : traction-compression simple ( $\sigma=\sigma_1, \sigma_2=0$ ), équilibitraction-compression ( $\sigma=\sigma_1=\sigma_2$ ) et cisaillement pur ( $\sigma=\sigma_1=-\sigma_2$ ). Le champ magnétique est appliqué parallèlement à la direction de la contrainte  $\sigma_1$ .**

## 4. Conclusion

Un modèle multi-échelle pour la prédiction du comportement magnéto-mécanique est présenté. Ce modèle inclut le calcul des pertes par hystérésis. Les résultats sont comparés avec des résultats d'essais originaux menés sur des éprouvettes de fer-silicium soumises à un chargement mécanique biaxial. Un bon accord qualitatif est trouvé. Un travail d'identification des paramètres matériaux est encore nécessaire pour atteindre un meilleur accord quantitatif. L'outil de modélisation permet cependant déjà de prévoir les tendances obtenues sur la susceptibilité et le champ coercitif lorsqu'un matériau magnétique est soumis à un chargement magnéto-mécanique multiaxial, comme c'est le cas dans la plupart des dispositifs électromagnétiques.

## 5. Références

- [1] M. Rekik, O. Hubert, L. Daniel, "Influence of a multiaxial stress on the reversible and irreversible magnetic behaviour of a 3%Si-Fe alloy", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, (à paraître), 2014.
- [2] L. Daniel, N. Galopin, "A constitutive law for magnetostrictive materials and its application to Terfenol-D single and polycrystals", *The European Physical Journal - Applied Physics*, **42(2)** :153-159, 2008.
- [3] L. Daniel, O. Hubert, N. Buiron, R. Billardon, "Reversible magneto-elastic behavior : a multiscale approach", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **56(3)** :1018-1042, 2008.
- [4] L. Daniel, M. Rekik, O. Hubert, "A multiscale model for magneto-elastic behaviour including hysteresis effects", *Archives of Applied Mechanics*, submitted.
- [5] H. Hauser, "Energetic model of ferromagnetic hysteresis: Isotropic magnetization", *Journal of Applied Physics*, **96(5)** : 2753–2767, 2004